

## 고정자 전류 기반의 MRAC를 이용한 유도전동기의 센서리스 벡터제어에서 회전자 시정수의 보상

박철우, 윤경섭\*, 임성운\*\*, 구분호\*\*, 권우현

경북대학교 전자공학과, \*거창전문대학 컴퓨터응용전자과, \*\*경일대학교 제어계측공학과

### The rotor time constant compensation in sensorless vector control using stator current based MRAC

Chul-woo Park, Kyung-sup Youn\*, Sung-woon Im\*\*, Bon-ho Ku\*\*, Woo-hyen Kwon  
Kyungpook National University, \*Keochang Provincial College, \*\*Kyungil University

#### ABSTRACT

The thesis proposes the sensorless vector control method that estimates the rotor speed and rotor time constant at the same time using stator current. In the proposed method, stator current error in the stationary reference frame is proportional to estimated speed error, and stator current error in the synchronous reference frame is proportional to estimated rotor time constant error. The proposed method can simultaneously produce a fast speed estimation and rotor time constant estimation. Therefore, this new method offers an improvement in the performance of a sensorless vector controller. And, the superiority of the proposed method is verified by simulation.

#### 1. 서 론

정확한 속도나 토크제어가 필요하고 전동기의 동적 특성이 시스템의 성능에 중요한 영향을 미치는 시스템에도 벡터제어 이론의 발달로 유도전동기가 많이 이용되고 있다. 유도전동기의 간접벡터제어에는 전동기의 속도 정보가 필요한데, 이를 위해서 리졸버나 엔코더 같은 속도센서를 전동기의 축에 부착시켜야 한다. 그러나 속도센서에 의해 제어 시스템과 전동기 사이의 연결선이 증가하게 되고, 이로 인하여 제어 시스템의 신호간의 간섭이 증가하게 된다. 또한 온도, 습도, 진동과 같은 동작 환경에 따라 정밀도가 제한되는 문제점이 있으며, 전동기 자체의 관성이나 마찰 이외에 부가적인 관성

이나 마찰이 발생한다. 특히 속도센서를 부착하기 불가능한 동작환경에서 정밀한 서보제어 성능이 요구될 때는 센서리스 벡터제어가 필수적이다. 따라서 유도전동기의 센서리스 벡터제어가 중요한 연구 과제가 되었고, 다양한 속도 추정 알고리즘과 센서리스 제어 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다[1-7].

센서리스 벡터제어에서는 회전자 속도의 추정과 슬립주파수의 계산에 전동기의 회로변수가 이용되기 때문에 회로변수들을 정확히 알아야 한다. 만약 잘못된 값으로 벡터제어할 경우 토크와 자속을 분리 제어할 수 없고, 속도 추정에도 오차가 발생하게 되어 벡터제어가 이루어지지 않는다. 전동기의 회로변수들은 잘못된 값을 알고 있을 수도 있고, 처음에 정확한 값을 알고 있었다고 하더라도 동작 중에 온도나 주파수 등의 영향으로 변하게 되므로 벡터제어시 회로변수의 보상이 반드시 필요하다. 회로변수 중에서도 회전자 시정수의 영향이 가장 크다고 할 수 있다.[1,5]

본 논문에서는 단자 전압과 전류로부터 추정된 고정자 전류와 실제 고정자 전류의 차이를 이용하여 회전자 속도와 회전자 시정수를 동시에 추정하는 새로운 센서리스 벡터제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법에서 속도 추정에 이용한 고정자 전류의 차이는 정지좌표계에서는 속도 추정 오차에 일차 비례하고, 동기좌표계에서는 회전자 시정수의 오차에 일차 비례하는 관계로 나타나므로 빠른 속도추정 특성과 회로변수의 변화에 대해 견실한 특성을 보인다. 따라서, 제안한 방법은 유도전동기의 센서리스 제어 시 속도추정 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 모의실험으로 확인한다.

## 2. 본 론

### 2.1 센서리스 벡터제어

유도전동기의 출력토크를 선형제어하기 위한 벡터제어는 회전자 자속각을 직접 측정하거나 추정하여 전동기 내에서 자속전류와 토크전류를 분리시켜 제어하는 방법이다. 벡터제어를 하기 위해서는 회전자 자속각을 정확히 아는 것이 중요하다. 일반적인 벡터제어에서는 회전자 축에 부착된 속도센서로 측정된 전동기의 속도를 이용하여 간접적으로 회전자 자속각을 추정한다. 속도센서가 있는 벡터제어 시스템은 정밀한 서보제어가 가능하지만, 속도센서로 인하여 여러 가지 문제점이 발생한다. 이와는 달리 센서리스 벡터제어는 유도전동기의 단자 전압과 전류로부터 회전자 속도를 추정하여 자속전류와 토크전류를 분리 제어하기 위한 회전자 자속의 위치정보를 얻고, 실제 전동기의 속도 제어에 이용한다. 그림 1은 유도전동기의 센서리스 벡터제어 블록도로서 속도센서를 이용하여 속도를 측정하는 일반적인 벡터제어와는 달리 전압과 전류로부터 추정된 속도를 벡터제어에 이용한다.

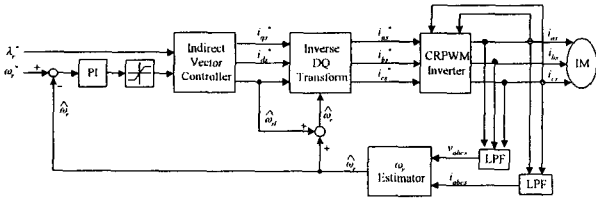


그림 1 유도전동기의 센서리스 벡터제어 블록도  
Fig. 1 Sensorless vector control block diagram

### 2.2 제안한 회전자 속도 추정 방법

유도전동기의 고정자 자속과 회전자 자속은

$$\lambda_s^s = \int (v_s^s - r_s i_s^s) dt \quad (1)$$

$$\lambda_r^s = \frac{L_r}{L_m} \lambda_s^s - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m} i_s^s$$

과 같다.

유도전동기의 방정식을 고정자 전류에 대해서 정리하면

$$i_{qs}^s = \frac{1}{L_m} (\lambda_{qr}^s - \omega_r T_r \lambda_{dr}^s) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{qr}^s \quad (2)$$

$$i_{ds}^s = \frac{1}{L_m} (\omega_r T_r \lambda_{qr}^s + L_m \lambda_{dr}^s) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{dr}^s$$

와 같이 나타낼 수 있다.

식 (1)에서 구한 회전자 자속과 회전자 속도 추정치  $\hat{\omega}_r$ 을 이용하여 고정자 전류를 추정하면

$$\hat{i}_{qs}^s = \frac{1}{L_m} (\lambda_{qr}^s - \hat{\omega}_r T_r \lambda_{dr}^s) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{qr}^s \quad (3)$$

$$\hat{i}_{ds}^s = \frac{1}{L_m} (\hat{\omega}_r T_r \lambda_{qr}^s + L_m \lambda_{dr}^s) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{dr}^s$$

과 같이 표현된다. 실제 고정자 전류와 추정된 고정자 전류 사이의 관계에서 회전자 속도를 추정하기 위한 과정은 다음과 같다. 우선 고정자 전류의 차이를 정리하면

$$\hat{i}_{qs}^s - i_{qs}^s = \frac{1}{r_r} \lambda_{dr}^s (\omega_r - \hat{\omega}_r) \quad (4)$$

$$i_{ds}^s - \hat{i}_{ds}^s = \frac{1}{r_r} \lambda_{qr}^s (\omega_r - \hat{\omega}_r) \quad (5)$$

와 같다. 식(4), (5)에서 Q축, D축 고정자 전류의 차이가 회전자 속도 추정 오차와 회전자 자속의 합수로 나타나므로 고정자 전류의 차이를 회전자 자속으로 나누어 주면 회전자 속도 추정 오차로 표현된다. 그러나, 정지좌표계에서 회전자 자속은 인가되는 전원의 주파수에 따라 변화하는 정현파이므로 고정자 전류의 차이를 회전자 자속으로 나누어 준 값으로 회전자 속도를 추정하는 것은 적절하지 못하다. 한편, 일반적으로 유도전동기의 벡터제어시 회전자 자속의 크기는 일정하게 유지되고, 약계자 영역에서 벡터제어가 되더라도 회전자 자속의 크기는 감소할 뿐이지 0이 되지 않는다. 따라서, 순시적으로 변화하는 회전자 자속값 대신 일정하게 유지되는 회전자 자속의 크기를 이용하기 위해서 식 (4)에  $\lambda_{dr}^s$ 를 곱하고, 식(5)에  $\lambda_{qr}^s$ 를 곱하여 더하면

$$(\hat{i}_{qs}^s - i_{qs}^s) \lambda_{dr}^s + (i_{ds}^s - \hat{i}_{ds}^s) \lambda_{qr}^s = (\omega_r - \hat{\omega}_r) \frac{|\lambda_r^s|^2}{r_r} \quad (6)$$

과 같이 표현된다. 식(6)을 회전자 속도의 오차에 대해 정리하면

$$\omega_r - \hat{\omega}_r = k [ (\hat{i}_{qs}^s - i_{qs}^s) \lambda_{dr}^s + (i_{ds}^s - \hat{i}_{ds}^s) \lambda_{qr}^s ] \quad (7)$$

과 같다. 여기서,  $k = \frac{r_r}{|\lambda_r^s|^2}$  이다.

따라서, 식(7)을 이용하여 고정자 전류와 회전자 자속으로부터 회전자 속도 추정을 위한 오차신호를 계산한 후, 적절한 비례이득 및 적분이득을 가지는 PI제어기를 통과시켜 궤환을 걸어 회전자 속도를 추정할 수 있다. 추정된 회전자 속도를 이용하여 계산한 고정자 전류가 실제 고정자 전류와 같아지면, 추정된 회전자 속도는 실제 회전자 속도와 일치하게 된다. 회전자 저항의 변화를 무시할 수 있거나, 회전자 저항 보상 알고리즘을 이용하여 회전자 저항을 보상하는 경우라면, 제안한 방법은 식(7)에서와 같이 고정자 전류의 오차가 회전자 속도의 오차에 대하여 일차함수의 형태로 나타나므로 빠른 수렴특성과 정확한 속도추정특성을 가진다.

### 2.3 회전자 시정수의 보상

유도전동기의 방정식으로부터 동기좌표계에서 고정자 전류는

$$\begin{aligned} i_{qs}^e &= \frac{1}{L_m} (\lambda_{qr}^e + T_r \omega_{sl} \lambda_{dr}^e) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{qr}^e \\ i_{ds}^e &= \frac{1}{L_m} (\lambda_{dr}^e - T_r \omega_{sl} \lambda_{qr}^e) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{dr}^e \end{aligned} \quad (8)$$

과 같이 회전자 자속과 회로변수들로 표현된다.

식(8)에서 회전자 시정수의 추정치  $\hat{T}_r$ 을 이용하여 고정자 전류를 추정해 보면

$$\begin{aligned} \hat{i}_{qs}^e &= \frac{1}{L_m} (\lambda_{qr}^e + \hat{T}_r \omega_{sl} \lambda_{dr}^e) + \frac{\hat{T}_r}{L_m} p \lambda_{qr}^e \\ \hat{i}_{ds}^e &= \frac{1}{L_m} (\lambda_{dr}^e - \hat{T}_r \omega_{sl} \lambda_{qr}^e) + \frac{\hat{T}_r}{L_m} p \lambda_{dr}^e \end{aligned} \quad (9)$$

와 같다.

식(9)에서 동기좌표계에서 회전자 자속의 미분이 포함된 항은 벡터제어의 정확성에 무관하게 비미분항에 비해 그 값이 매우 적다. 따라서, 미분항을 무시할 수 있고, 실제 고정자 전류와 추정된 고정자 전류의 오차를 계산하면

$$\begin{aligned} i_{qs}^e - \hat{i}_{qs}^e &\approx \frac{\omega_{sl} \lambda_{dr}^e}{L_m} (T_r - \hat{T}_r) \\ \hat{i}_{ds}^e - i_{ds}^e &\approx \frac{\omega_{sl} \lambda_{qr}^e}{L_m} (T_r - \hat{T}_r) \end{aligned} \quad (10)$$

과 같다.

항상 일정하게 유지되는 회전자 자속의 크기를 이용하기 위하여 식(10)에 회전자 자속을 곱하여 더하면

$$(i_{qs}^e - \hat{i}_{qs}^e) \lambda_{dr}^e + (i_{ds}^e - \hat{i}_{ds}^e) \lambda_{qr}^e = \frac{\omega_{sl} |\lambda_r|^2}{L_m} (T_r - \hat{T}_r) \quad (11)$$

로 표현되고, 식(11)을 회전자 시정수의 오차에 대해 정리하면

$$(T_r - \hat{T}_r) = m [(i_{qs}^e - \hat{i}_{qs}^e) \lambda_{dr}^e + (i_{ds}^e - \hat{i}_{ds}^e) \lambda_{qr}^e] \quad (12)$$

와 같다. 여기서,  $m = L_m / (\omega_{sl} |\lambda_r|^2)$  이다.

따라서, 식(12)를 이용하여 회전자 시정수 추정을 위한 오차신호를 계산한 후, 적절한 비례이득 및 적분이득을 가지는 PI제어를 통과시켜 제환을 걸어 회전자 시정수를 추정할 수 있다. 고정자 전류의 오차를 이용한 회전자 시정수 보상방법에서는 고정자 전류의 오차가 회전자 시정수의 오차에 대하여 일차함수 형태로 나타나므로 빠른 수렴특성을 가진다. 그리고, 이 방법은 정상상태가 아닌 일반적인 경우에 기초해서 전개한 식이므로 정상상태 뿐만 아니라 과도상태에서도 좋은 수렴특성을 나타낸다.

### 2.4 모의실험

제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 MATLAB의 Simulink를 이용하여 모의실험을 하였다. 이때 이용한 유도전동기의 회로변수는 다음과 같다.

표 1 모의실험에 사용된 유도전동기 회로변수  
Table 1 Parameters of induction motor

정격출력	1 [Hp]	고정자저항 ( $r_s$ )	2.5 [ $\Omega$ ]
정격전압	220 [V]	회전자저항 ( $r_r$ )	1.95 [ $\Omega$ ]
정격전류	3 [A]	고정자 누설인덕턴스( $L_{ls}$ )	0.0075 [H]
정격주파수	60 [Hz]	회전자 누설인덕턴스( $L_{lr}$ )	0.0075 [H]
극 수	4	상호 인덕턴스 ( $L_m$ )	0.153 [H]

그림 2에는 제안한 고정자 전류의 오차를 이용한 속도 추정 방법을 이용하여 센서리스 벡터제어를 수행하고, 회전자 시정수를 보상하지 않을 때의 속도 추정 과형을 나타내었다. 속도명령 500[rpm], 부하토크 2[Nm], 자속 명령치 0.32[Wb]인 상태에서 센서리스 벡터제어를 수행하였고, 일정 시간이 지난 후 속도가 정상상태에 도달하였을 때 회전자 시정수를 50% 변화하였다. 그림 2(a)에는 벡터제어와 속도추정에 이용되는 회전자 시정수를 나타내었다. 그림 2(b)에는 제안한 방법을 이용하여 추정된 회전자 속도를 나타내었고, 회전자 시정수가 변화하기 이전까지는 일정한 500[rpm]의 속도를 가지는 것으로 센서리스 벡터제어가 정확히 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, 회전자 시정수가 50% 변화했을 때, 약 30[rpm]의 속도 추정 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

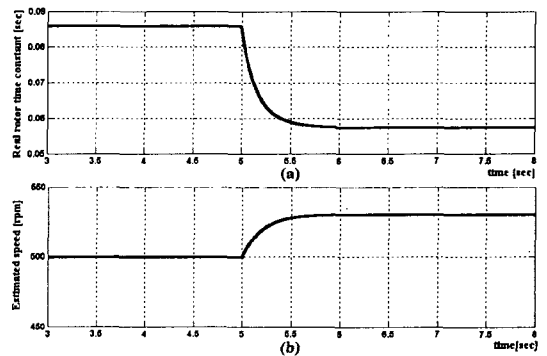


그림 2 회전자 시정수 변화의 영향  
Fig. 2 The influence of  $T_r$  variation

그림 3, 4에는 제안한 방법을 이용하여 센서리스 벡터제어를 수행하면서 회전자 시정수의 변화를 추정할 때의 파형을 나타내었다. 그림 3(a)에는 실제 회전자 시정수를, 그림 3(b)에는 제안한 방법을 이용하여 추정한 회전자 시정수를 나타내었고, 두 파형이 일치하는 것으로 제안한 방법은 변화하는 회전자 시정수를 정확히 추정할 수 있음을 알 수 있다. 그림 4(a)에는 실제 회전자 속도를, 그림 4(b)에는 제안한 방법을 이용하여 추정한 회전자 속도를 나타내었다. 두 파형이 일치하는 것으로 센서리스 벡터제어가 정확히 되는 것을 알 수 있다. 따라서, 제안한 방법은 센서리스 벡터제어시 회전자 시정수를 정확히 보상할 수 있으므로 센서리스 벡터제어기의 성능을 향상시킬 수 있다.

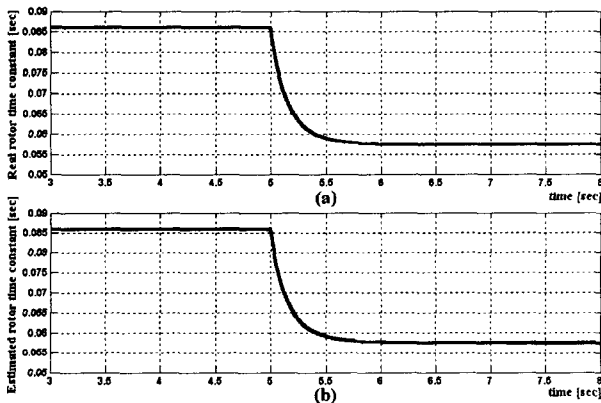


그림 3 실제 회전자 시정수와 추정한 회전자 시정수  
Fig. 3 Real Tr and estimated Tr

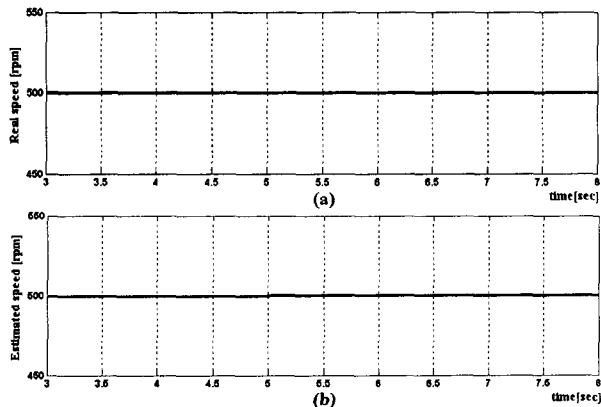


그림 4 실제 속도와 추정한 회전자 속도  
Fig. 4 Real speed and estimated speed

### 3. 결 론

본 논문에서는 센서리스 벡터제어기의 성능을 향

상시킬 수 있는 새로운 회전자 속도 추정방법과 회전자 시정수 보상 방법을 제안하였다. 단자 전압과 전류로부터 회전자 자속을 계산한 후, 고정자 전류를 추정하고, 실제 고정자 전류와의 차이를 PI제어기를 통과시켜 전동기의 속도를 추정하였고, 동시에 회전자 시정수를 보상하였다.

제안한 방법은 정자좌표계에서 고정자 전류의 차이로 구성된 전류오차가 회전자 속도 추정오차에 일차비례 하고, 동기좌표계에서 고정자 전류의 차이로 구성된 전류오차가 회전자 시정수 오차의 일차비례하므로 빠르고 정확한 수렴특성을 가진다. 그리고, 제안한 방법이 타당함을 모의실험을 통하여 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] Colin Schauder, "Adaptive Speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 5, pp. 1054-1061, September/October, 1992.
- [2] Fand-Zheng Peng and Tadashi Fukao, "Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1234-1240, September/October, 1994.
- [3] Mohammad N. Marwali and Ali Keyhani, A Comparative Study of Rotor Flux Based MRAS and Back EMF Based MRAS Speed Estimators for Speed Sensorless Vector Control of Induction Machines, *IEEE-IAS Annual Meeting*, pp. 160-166, 1997.
- [4] F. Profumo, G. Griva, M. Pastorelli and J.C. Moreira, "Universal Field oriented controller based on airgap flux sensing via third harmonic stator voltage," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 2, pp. 448-455, September/October, 1994.
- [5] Hisao Kubota and Kouki Matsuse, "Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1219-1224, September/October, 1994.
- [6] Y. R. Kim, S. K. Sul and M. H. Park, "Speed Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using an Extended Kalman Filter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1225-1233, September/October, 1994.
- [7] Y. S. Kim, S. U. Kim and I. W. Yang, "Implementation of a speed sensorless vector control of induction motor by reduced-order extended kalman filter," *IEEE-IAS Annual Meeting*, pp. 197-203, 1995.